

[变电站]

220 kV变电站线路开关即分故障 处置分析

文/许臻 姚卿

国网上海市电力公司超高压分公司

在电力系统中，220 kV变电站负责电能的高效传输和分配。线路开关的即分故障是一种常见但复杂的问题。这种故障不仅影响电网的稳定性和可靠性，还可能导致严重的经济损失和安全风险。因此，深入理解这类故障的特性、原因以及有效的处置方法，对于确保电力系统的顺畅运行至关重要。首先分析220 kV变电站线路开关即分故障的初步判断和原因，通过研究故障检测与诊断技术，提出故障的具体识别和分析方法，也描述此类故障的预防策略，减少未来发生的概率和影响，全面提升变电站的运行安全和效率。

在当代电力系统的运行与管理中，220 kV变电站作为重要的电能分配和转换节点，其稳定性和可靠性对整个电网的安全运行具有至关重要的影响。特别是变电站内线路开关的即分故障已成为影响电网稳定性的主要因素之一。这类故障不仅会导致电网瞬时不稳定，还可能触发保护装置误动作，引发连锁反应，最终导致大面积停电甚至设备损坏。因此，深入分析220 kV变电站线路开关即分故障的成因、特点及其处置策略，对于提高电力系统的稳定性和可靠性具有重大意义。

220 kV变电站线路开关即分故障分析

1. 故障初步判断

在220 kV变电站中，线路开关即分故障的出现往往伴随着一系列的电气现象，其初步判断是基于对这些现象的综合分析，如图1所示。

当线路开关发生即分故障时，最直观的现象是开关操作后不久再次断开，这通常伴随着一系列保护动作和信号指示。开关的这种行为可能是由于过电流、过电压和绝缘故障等引起的，这些情况都会触发相应的保护装置。在初步判断故障区域时，首

要任务是分析保护动作记录和开关动作序列。保护动作记录可以提供故障发生时的关键信息，通过分析这些数据，可以推断出故障发生的大致位置和性质。包括开关闭合后到再次断开的時間间隔、开关操作的次数以及开关状态的变化等。这些数据有助于理解故障发生的过程，从而判断故障的类型。如图1所示。

2. 故障原因分析

在220 kV变电站的线路开关即分故障分析中，故障发生的原因通常是多因素共同作用的结果，涉及到电力系统的多个方面，包含设备老化、设计缺陷和外部环境因素等，如图2所示。

设备老化是导致即分故障的一个主要原因。随着运行时间的增长，变电站内部的线路开关等电力设备会逐渐老化，其绝缘性能降低，接触电阻增加，从而增加了故障发生的风险。特别是对于那些长期处于高负荷运行状态的设备，老化速度会更快^[1]。设计缺陷也是一个重要的原因。包括开关设计中的缺陷，如果开关的触头设计不当，可能导致接触不良，进而引发即分故障。

此外，整个变电站的设计，包括系统布局、保

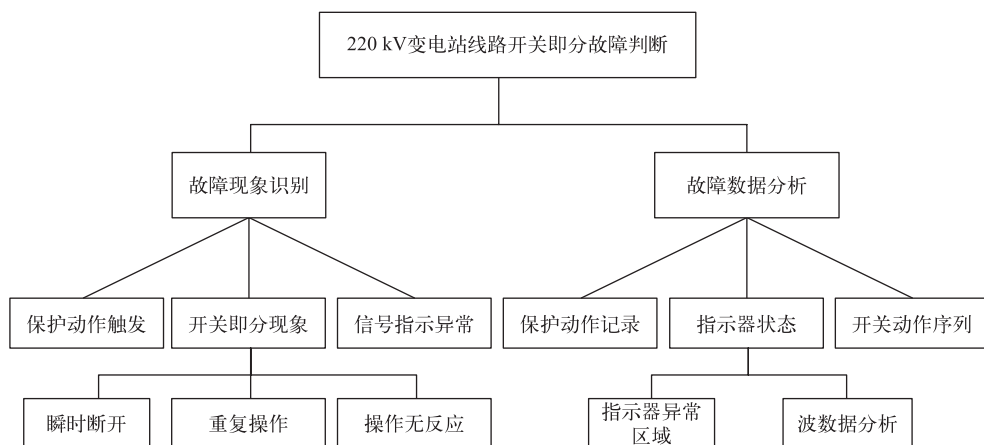


图1 220 kV变电站线路开关即分故障判断

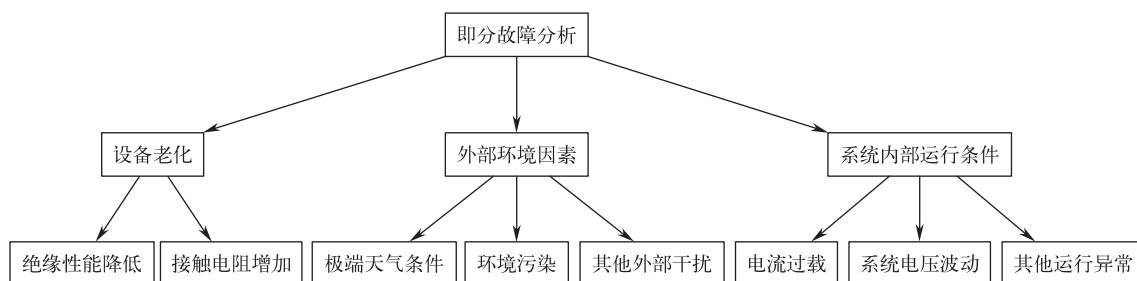


图2 故障原因

护方案的设计等，也会影响到线路开关的运行状态和故障发生的概率。外部环境因素对线路开关的运行同样具有重大影响。在极端天气条件下可能加速设备的老化，降低其绝缘性能。系统内部的运行条件也可能导致线路开关即分故障。通过全面的分析，可以更准确地识别出故障的根本原因，从而为制定有效的预防措施和改进策略提供坚实的基础。

3. 故障检测与诊断技术研究

220 kV变电站线路开关即分故障的检测与诊断领域的研究，主要集中在开发和评估各种在线监测系统、故障录波分析技术以及基于数据驱动的诊断算法。基于机器学习的实时监测算法在故障检测和诊断中的应用。首先，考虑在线监测系统的应用。这类系统通过持续监测变电站内部的关键参数，实时捕获可能指示故障发生的信号。以电流监测为例，系统可以利用如下公式计算电流的实时变化

$$I(t) = I_0 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

式中， $I(t)$ 为时刻 t 的电流值； I_0 为电流幅值； f 为系统频率； ϕ 为初始相位。

借助分析 $I(t)$ 的异常模式，可以初步判断是否存在故障，当检测到可能的故障信号时，故障录波器将记录下关键的波形数据，供后续分析，其波形可以表示为

$$I_{\text{短路}}(t) = I_{\text{正常}} + I_{\text{额外}} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

式中， $I_{\text{正常}}$ 为正常运行时的电流； $I_{\text{额外}}$ 为故障引起的额外电流； τ 为一个表征故障冲击衰减的时间常数。

通过分析，可以对故障的性质和严重程度进行评估。基于机器学习的实时监测算法通常涉及到数据的收集、特征提取和模型训练^[2]。假设有一组从监测系统收集到的电流和电压数据，可以定义一个特征向量，这个特征向量可以用于训练一个分类模型，模型的目标是将正常运行状态和故障状态区分开来。SVM模型的决策函数可以表示为

$$f(X) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(X, X_i) + b) \quad (3)$$

式中， α_i 为模型参数； y_i 为训练数据的标签； $K(X, X_i)$ 为核函数，用于计算特征向量之间的相似度，而是偏置项。

利用这种方式，模型能够学习区分正常和故障

状态的特征模式,实现对即分故障的有效诊断。在机器学习模型训练完成后,其性能评估涉及模型的准确性、敏感性和特异性的评估。可以借助混淆矩阵来进行量化,其中包括真正例、假正例、真负例和假负例。准确性可以根据以下公式计算

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (4)$$

敏感性和特异性则分别表示为

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (5)$$

$$\text{Specificity} = \frac{\text{TN}}{\text{TN} + \text{FP}} \quad (6)$$

通过这些评估指标,可以确定模型在实际应用中的可靠性和适用性。

故障处置方案

1. 紧急响应措施

紧急响应措施需要在故障发现的第一时间内迅速而准确地执行,以避免故障扩散及其可能造成的更大范围的电力系统崩溃。紧急响应措施通常包括紧急停运、隔离故障区域、通知相关部门等一系列操作。每个步骤都需要精确控制,确保在维护系统稳定的同时,最大限度地减少对电网及用户的影响。紧急停运是在检测到线路开关即分故障后的首要措施。这一操作旨在立即切断故障线路,防止故障蔓延到电网的其他部分^[3]。紧急停运通常根据自动化保护装置执行,这些装置能够在毫秒级别内识别异常情况,并做出切断电源的决策。隔离故障区域是紧随紧急停运之后的步骤,包括使用断路器、隔离开关等电气设备物理切断故障线路,从而确保故障不会影响到变电站内其他正常运行的部分。在隔离故障区域时,操作人员需要考虑到电网的整体运行状态和故障线路与其他部分的连接情况,确保隔离操作既有效又安全。

2. 故障定位

在220 kV变电站线路开关即分故障的处理过程中,故障定位目的是为了快速且准确地确定故障发生的具体位置。为了实现这一目标,可以采用基于行波法的故障定位算法。该算法通过分析故障产生的行波信号来确定故障点的位置。行波法的基本原理是利用故障点两侧的行波时间差来计算故障位置,其核心公式可以表示为

$$D = \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \quad (6)$$

式中, D 为故障点到测试点的距离; v 为行波在电缆中的传播速度; t_1 和 t_2 分别为故障波到达两个测试点的时间。

利用测量故障行波在不同位置的到达时间,可以准确计算出故障点的位置。为了提高故障定位的准确性,可以进一步应用基于最小二乘法的优化算法。在故障定位的背景下,可以通过最小化行波时间差的预测值和实际值之间的差异来优化故障点的位置估计。设定故障点的预测位置为,则最小化的目标函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (v(t_{2i} - t_{1i}) - 2x)^2 \quad (7)$$

式中, t_{1i} 和 t_{2i} 分别为第 i 对测试点的行波到达时间。

通过求解这个最小化问题,可以得到更准确的故障位置 x 。在实际应用中,为了提高故障定位的速度和准确性,可以结合使用多种传感器和数据采集设备。

3. 恢复供电与系统重构

在220 kV变电站线路开关即分故障的处理过程中,一旦完成了对故障的安全隔离,恢复供电和执行系统重构这一阶段的目标是在确保系统安全的前提下,尽快恢复到正常运行状态。快速恢复供电的关键是实施有效的负荷转移。在执行负荷转移时,必须详细评估各供电路径的容量和稳定性,以避免过载和可能的联锁故障。具体来说,需要计算各条路径的热限制和稳定限制,并据此制定负荷转移方案。热限制通常由导线和设备的最大承受温度决定,而稳定限制则涉及到系统动态响应的考量。

系统重构是另一个重要环节。系统重构指的是在保持电网整体稳定的前提下,重新配置网络的拓扑结构。这一过程需要综合考虑电网的电压水平、功率流动和系统的可靠性。系统重构的一个关键步骤是同步操作,即在变更网络配置时,确保各部分的电压相位匹配,以避免引入新的不稳定因素。此外,还需要对重构后的网络进行稳定性分析,以确保在各种可能的负荷条件下都能安全运行。在整个恢复供电和系统重构的过程中,使用高级的电力系统分析工具是必不可少的。

4. 预防策略

在电力工程领域,针对220 kV变电站线路开关

即分故障的预防策略是多方面的，涵盖了设计、运维和监测等环节，旨在通过长期的改进措施，最大限度地减少类似故障的发生概率。在设计阶段，重点是提高变电站内部设备的质量和可靠性，特别是对于线路开关等关键设备。包括采用更高标准的绝缘材料、更精确的机械结构设计以及更可靠的电气组件。同时，变电站的总体设计应确保有足够的冗余和灵活性，以应对突发事件和异常条件^[4]。包括合理的系统布局、充足的备用容量以及有效的负荷

管理策略。在运维方面，定期的维护和检修对于预防故障至关重要。这涉及到对变电站内所有设备进行定期的物理检查、性能测试和必要的维护工作。特别是对于老化的设备，应进行更频繁的检查 and 及时的更换或升级。此外，运维人员的培训和技能提升也是重要的一环。确保运维团队具备最新的知识和技能，能够有效地识别潜在的问题并采取适当的预防措施。预防策略见表1。

表1 220 kV变电站线路开关即分故障的预防策略

领域	预防策略	详细措施
设计	提高设备质量和可靠性	使用更高标准的绝缘材料、更精确的机械结构设计、更可靠的电气组件
设计	确保系统冗余和灵活性	合理的系统布局、充足的备用容量、有效的负荷管理策略
运维	定期维护和检修	对所有设备进行定期的物理检查、性能测试和必要的维护工作
运维	针对老化设备的特别关注	对老化设备进行更频繁的检查 and 及时的更换或升级
运维	培训和技能提升	确保运维团队具备最新的知识和技能，有效识别和预防问题
监测	采用先进监测技术	持续监测电网运行状态、使用故障录波器等设备记录异常事件
监测	数据实时分析	及时发现系统异常行为，提前采取避免故障的措施

结束语

对于220 kV变电站线路开关即分故障的研究，不仅是解决当前电力系统面临的具体技术问题，更是推动电力系统稳定性和安全性向前发展的重要一环。通过对此类故障的深入分析和系统性研究，可以显著提升变电站及整个电网的运行效率和可靠性，从而确保电力供应的连续性和安全性。EA

(收稿日期：2024-02-22)

参考文献

[1] 刘懿，胡磊．220 kV断路器控制电路故障的

处置技术分析[J]．军民两用技术与产品，2017(12)：146．
[2] 董良彬，杨玮光，陈罗．水口电厂220 kV开关站水越 I 路线路故障分析和处置[J]．福建水力发电，2020(2)：33-36．
[3] 王玉忠．分析220 kV输电线路检修常见故障[J]．大科技，2016(30)：106-107．
[4] 朱彦龙，彭德清，牛志跃，等．220 kV电力线路的常见运行故障与对策[J]．大科技，2018(12)：69．

